

# 超音波定位系統裝置位置 與誤差之關聯

盧樹台<sup>1</sup>

## 摘 要

本論文提出一種超音波導盲系統，此超音波導盲系統包含三個超音波接收器及一個超音波發射器，可以計算出凌空障礙物的座標位置，以協助盲胞做凌空障礙物的感測與預警。三個超音波接收器分別被安置在一個直角等腰三角形的三個頂點，超音波發射器則被放置在直角等腰三角形的直角。本論文對同一個超音波導盲系統，探討兩種不同位置的安排，並以盲人頭部前方 1 至 2 公尺、 $\pm 15$  度的範圍為測試區，比較該兩種不同位置安排的定位誤差，以作為後續實作系統之參考。

**關鍵詞：**超音波定位系統，誤差分析

---

<sup>1</sup> 清雲科技大學資訊工程系副教授

# Relationship between the Detecting Deviations and the Sensor Arrangements in an Ultrasonic Positioning System

Shuh-Tai Lu<sup>\*</sup>

## Abstract

An ultrasonic positioning system is introduced in this paper. With the help of the system the blind can get early warning of where the obstacle is. The system has three ultrasonic sensors and an ultrasonic emitter. The sensors are located at different apexes of a right triangle. The ultrasonic emitter is arranged at the right angle of the right triangle. This paper discusses two different device position arrangements and their positioning deviations for the same positioning system. An area of  $\pm 15^\circ$ , 1 meter to 2 meters in front of the sensors is used as a test area for the two different arrangements. Some simulation results and conclusions are also given in this paper.

**Key words:** ultrasonic positioning system, deviation analysis.

---

<sup>\*</sup> Associate Professor, Department of Computer Science and Information Engineering, Ching Yun University.

## 一、前言

目前我們正在進行一種超音波導盲系統的研究，此種系統是模仿蝙蝠以超音波辨識環境的原理，來協助盲胞作凌空障礙物的感測與預警。此超音波導盲系統是利用三個超音波接收器，安排成直角等腰三角形排列，並且在直角等腰三角形的直角放置一個超音波發射器。配合發射和接收電路，再經由三個超音波接收器所接收的回波訊號時間差，可以計算出凌空障礙物的座標。

一般而言，使用導盲犬是一種常見的導盲方式，但導盲犬的挑選訓練極為不易且成本又過於昂貴，並且有壽命之問題。另一種可行的導盲方式是使用電子導盲輔具，不需要如同訓練導盲犬般花費高昂的成本，也沒有導盲犬壽命終了，而又需重新適應的問題。這方面的研究，國內相關的研究有公私立大學的碩士論文[2-5]及交大電控所未開泰教授所指導的導盲機器人 [7-10]，國外則有日本的“Guide Dog Robot”[15]，和密西根大學機器人實驗室的避障系統 Obstacle Avoidance System (OAS) [12, 17]等。而以此種自走式機器人的引導方式，視障使用者是被動地被引導，行走的路徑規劃是由機器人決定，使用者是被機器人引導行動。

密西根大學機器人實驗室後來又以 OAS 為基礎，開發出一種穿戴式輔具，這是配掛於腰帶上，半環狀排列的超音波行進輔具( NavBelt ) [11,13,14]，主動偵測前方是否有障礙物，並以偵測系統判斷並透過聽覺與觸覺的方式給予使用者指示，引導使用者避開障礙物。

另外，導引式手杖( GuideCane ) [6,16]為密西根大學繼 NavBelt 之後研發出來的，其較之前更好的優點在於將設備由人背負改裝置於一雙輪的小車子上，減輕了使用者所需背負的重量。

但由於一般的電子導盲輔具大都著重於地面障礙物的偵測，對於頭部周圍的凌空障礙物的部份卻忽略了。本文著重在將超音波導盲系統用於凌空障礙物座標的計算，以及對同一個超音波導盲系統，探討兩種不同位置的安排，並以盲人頭部前方 1 至 2 公尺、 $\pm 15^\circ$  度的範圍為測試區，比較該兩種不同位置安排的定位誤差，以作為後續實作系統之參考。

## 二、超音波導盲系統的定位計算

### 2.1 第一種位置安排的超音波導盲系統

第一種位置安排的超音波導盲系統，是將三個超音波接收器 A,B,C 以直角等腰三角形方式排列，而在直角等腰三角形的直角放置一個超音波發射器 E，其架構對稱於 y 軸，各元件位置安排如圖 1。

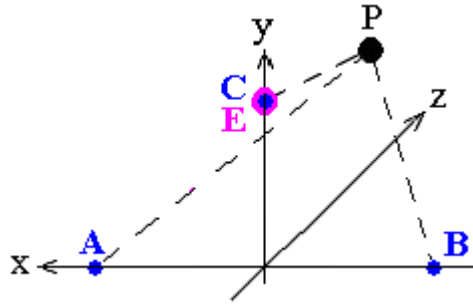


圖 1 第一種位置安排的超音波導盲系統

此系統是將超音波發射器 E 發出一個脈波，在過程中如果接觸到障礙物 P 時，此脈波將反射回接收器，再由系統依據超音波接收與發射時間差，計算出障礙物的距離及座標位置。我們首先定義超音波發射器 E、三個超音波接收器 A,B,C 與待測障礙物 P 的座標如下(單位為公分)：

C 點與 E 點座標同為  $(0, L, 0)$

A 點座標為： $A(L, 0, 0)$

B 點座標為： $B(-L, 0, 0)$

P 點座標為： $P(x, y, z)$

由 E 點至 P 點再至 A 點距離  $D_{EPA}$  可計算如方程式(1)

$$D_{EPA} = \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} \quad (1)$$

由 E 點至 P 點再至 B 點距離  $D_{EPB}$  可計算如方程式(2)

$$D_{EPB} = \sqrt{(x+L)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} \quad (2)$$

由 E 點至 P 點再至 C 點距離  $D_{EPC}$  可計算如方程式(3)

$$D_{EPC} = 2\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} \quad (3)$$

因超音波可測得  $D_{EPA}$ 、 $D_{EPB}$  及  $D_{EPC}$ ，故此三個參數可被視為已知。

我們可以利用牛頓-拉弗森疊代法(Newton-Raphson Iteration Method) [1]來求解方程式(1)至方程式(3)的非線性方程式，首先令

$$f_1(x, y, z) = \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} - D_{EPA} \quad (4)$$

$$f_2(x, y, z) = \sqrt{(x+L)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} - D_{EPB} \quad (5)$$

$$f_3(x, y, z) = 2\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2} - D_{EPC} \quad (6)$$

接下來求取 Jacobian 矩陣中的元素如下：

$$\frac{\partial f_1}{\partial x} = \frac{x-L}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{y-L}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{z}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{z}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x} = \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{(x+L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{y-L}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{z}{\sqrt{(x+L)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{z}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x} = \frac{2x}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial y} = \frac{2(y-L)}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial z} = \frac{2z}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2 + z^2}} \quad (15)$$

若給定障礙物座標初值  $x_i$ 、 $y_i$  及  $z_i$ ，我們可以由方程式(16)中得到  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  及  $\Delta z_i$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(x_i, y_i, z_i) \\ f_2(x_i, y_i, z_i) \\ f_3(x_i, y_i, z_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

如此，修正後的障礙物座標  $x_{i+1}$ 、 $y_{i+1}$  及  $z_{i+1}$  可以計算如下

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i \quad (17)$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (18)$$

$$z_{i+1} = z_i + \Delta z_i \quad (19)$$

從方程式(16)至方程式(19)的疊代過程一直持續到  $f_1^2 + f_2^2 + f_3^2$  收斂至一容許誤差值之內為止，最後我們會得到準確的障礙物座標。

## 2.2 第二種位置安排的超音波導盲系統

第二種位置安排的超音波導盲系統，是將第一種位置安排的超音波導盲系統順時針旋轉  $135^\circ$ ，且發射器 E 置於系統參考座標原點的位置，各元件位置安排如圖 2。

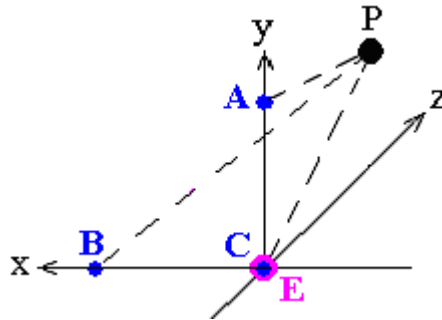


圖 2 第二種位置安排的超音波導盲系統

我們首先定義超音波發射器 E、三個超音波接收器 A,B,C 與待測障礙物 P 的座標如下(單位為公分)：

C 點與 E 點座標同為  $(0, 0, 0)$

A 點座標為： $A(0, \sqrt{2}L, 0)$

B 點座標為： $B(\sqrt{2}L, 0, 0)$

P 點座標為： $P(x, y, z)$

由 E 點至 P 點再至 A 點距離  $D_{EPA}$  可計算如方程式(20)

$$D_{EPA} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \sqrt{2}L)^2 + z^2} \quad (20)$$

由 E 點至 P 點再至 B 點距離  $D_{EPB}$  可計算如方程式(21)

$$D_{EPB} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{(x - \sqrt{2}L)^2 + y^2 + z^2} \quad (21)$$

由 E 點至 P 點再至 C 點距離  $D_{EPC}$  可計算如方程式(22)

$$D_{EPC} = 2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (22)$$

接下來，令

$$f_1(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + (y - \sqrt{2}L)^2 + z^2} - D_{EPA} \quad (23)$$

$$f_2(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{(x - \sqrt{2}L)^2 + y^2 + z^2} - D_{EPB} \quad (24)$$

$$f_3(x, y, z) = 2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - D_{EPC} \quad (25)$$

接下來求取 Jacobian 矩陣中的元素如下：

$$\frac{\partial f_1}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y - \sqrt{2}L)^2 + z^2}} \quad (26)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{y - \sqrt{2}L}{\sqrt{x^2 + (y - \sqrt{2}L)^2 + z^2}} \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial z} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{z}{\sqrt{x^2 + (y - \sqrt{2}L)^2 + z^2}} \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{x - \sqrt{2}L}{\sqrt{(x - \sqrt{2}L)^2 + y^2 + z^2}} \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{y}{\sqrt{(x - \sqrt{2}L)^2 + y^2 + z^2}} \quad (30)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial z} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{z}{\sqrt{(x - \sqrt{2}L)^2 + y^2 + z^2}} \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x} = \frac{2x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (32)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial y} = \frac{2y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (33)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial z} = \frac{2z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (34)$$

同理，若給定障礙物座標初值  $x_i$ 、 $y_i$  及  $z_i$ ，我們可以由方程式(35)中得到  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  及  $\Delta z_i$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(x_i, y_i, z_i) \\ f_2(x_i, y_i, z_i) \\ f_3(x_i, y_i, z_i) \end{bmatrix} \quad (35)$$

如此，修正後的障礙物座標  $x_{i+1}$ 、 $y_{i+1}$  及  $z_{i+1}$  可以計算如下

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i \quad (36)$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (37)$$

$$z_{i+1} = z_i + \Delta z_i \quad (38)$$

從方程式(35)至方程式(38)的疊代過程一直持續到  $f_1^2 + f_2^2 + f_3^2$  收斂至一容許誤差值之內為止，最後我們也會得到準確的障礙物座標。

### 三、超音波導盲系統的定位誤差

在實作系統之前，我們想先瞭解由三個超音波接收器的測距誤差，對凌空障礙物座標計算造成的影響。在本研究中，我們考慮凌空障礙物在盲人頭部前方 1 至 2 公尺、 $\pm 15$  度的範圍內，最大測量誤差會發生在盲人前方 2 公尺、 $\pm 15$  度的邊界上。接著，我們以圖 3 及圖 4 所示的 N1、E1、S1、W1 以及 N2、E2、S2、W2 八點來做參考，以模擬測距誤差產生時，對凌空障礙物座標計算所產生的影響。此八個點的座標分別為：N1( 0,  $100\tan 15^\circ$ , 100)、E1(  $100\tan 15^\circ$ , 0, 100)、S1( 0,  $-100\tan 15^\circ$ , 100)、W1(  $-100\tan 15^\circ$ , 0, 100) 以及 N2( 0,  $200\tan 15^\circ$ , 200)、E2(  $200\tan 15^\circ$ , 0, 200)、S2( 0,  $-200\tan 15^\circ$ , 200)、W2(  $-200\tan 15^\circ$ , 0, 200)。在以下的誤差分析比較中，我們探討了兩種不同位置安排的直角等腰三角形超音波導盲系統，其  $L$  值為 7cm。

我們對兩種不同位置安排的直角等腰三角形超音波導盲系統，考慮其測距誤差  $\Delta D_{EPA}$ 、 $\Delta D_{EPB}$ 、 $\Delta D_{EPC}$  分別由 -2.0 cm 變化至 +2.0 cm 時，八個參考點的凌空障礙物座標



計算誤差  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  及  $\Delta z$  如表 1 至表 8 所示。

表一至表八中的  $D_{XYZ}$  計算如方程式(39)，此處  $D_{XYZ}$  提供了障礙物計算座標與參考點之間誤差距離的資訊。

$$D_{XYZ} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (39)$$

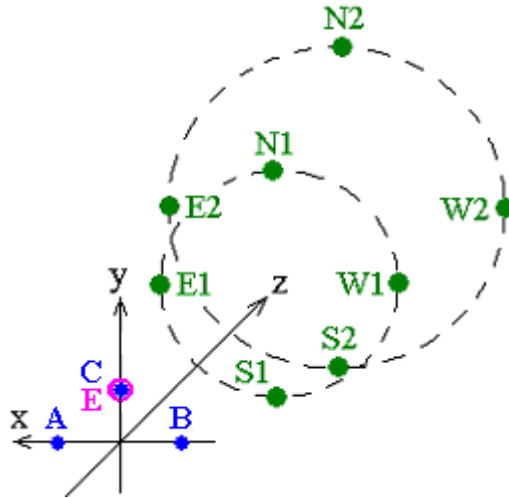


圖 3 第一種安排的受測區域位置圖

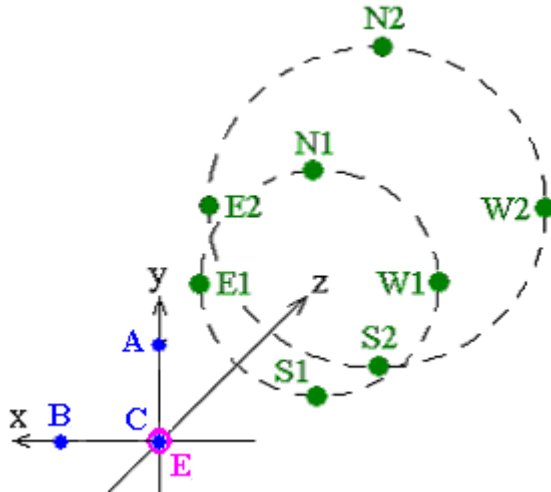


圖 4 第二種安排的受測區域位置圖

## 四、討論

我們以市售益眾科技公司[18]生產的超音波測距儀 A10-0002 的規格為測試參考，該

系統有效距離為 400 公分，最佳準確度可達 $\pm 1$  公分。相關的電路設計及原理，可參考該產品的說明書。為後續研製我們自己的系統，我們將略為修改該公司的電路。

經過審慎的考量，比照益眾科技公司的規格，在本論文中，我們將感測範圍限定在系統前方 100 至 200 公分，且最大誤差考慮增加至 $\pm 2$  公分是合理的。

## 五、結論

本研究主要目的在實作導盲超音波定位系統之前，瞭解同樣的直角等腰三角形超音波導盲系統之兩種超音波發射器位置安排與定位誤差的關係，結論如下：

- (一)比較方程式(1)至(19)與方程式(20)至(38)，可知對嵌入式系統程式設計而言，兩者的運算複雜度是相同的。
- (二)比較表 1 至表 8，我們發現在同樣的測距誤差下，兩者的 $\Sigma D_{XYZ}$  差距不大，且互有消長。
- (三)比較表 1 至表 8，我們也發現當三個接收器的測距誤差相同時(如  $\Delta DEPA$ 、 $\Delta DEPB$ 、 $\Delta DEPC$  同時為+2cm 或-2cm)，定位誤差都會大幅減少。

因此，在實作系統時，可搭配帽子的造型，選擇合適的安排，來製作頭戴式超音波導盲裝置。另外，若能將三個接收器的電路特性調整到一致，就可以大幅減少超音波導盲系統的定位誤差。

## 六、致謝

本文感謝行政院國家科學委員會專題研究計畫 NSC 94-2622-E-231-009-CC3 提供研究經費，特此致謝。

## 七、參考文獻

- 施澄鐘，應用數值分析，松崗電腦圖書，台北，民國八十二年。
- 孫中麒，「低價位之導盲系統」，國立中央大學，碩士論文，民國九十四年。
- 陳巧茵，「小型自走車以超音波避障之研究」，國立成功大學，碩士論文，民國九十三年。
- 黃立坤，「超音波投控系統之研製」，私立逢甲大學，碩士論文，民國九十一年。
- 楊雅兆，「使用超音波感測之自走車避障實務設計」，私立中原大學，碩士論文，民國九十三年。
- Johann Borenstein, Iwan Ulrich, "The GuideCane - A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1283-1288. Albuquerque, NM, April 21-27, 1997.
- Charles C. Chang, Kai-Tai Song, "Environment Prediction for a Mobile Robot in a Dynamic Environment", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol.13, No.6, pp.862-872, December 1997.
- Ti-Chung Lee, Kai-Tai Song, "Tracking Control of Unicycle-Modeled Mobile Robots Using a

- Sturation Feedback Controller”, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol.9, No.2, pp.305-318, March 2001.
- Shung-Tsang Tseng, Kai-Tai Song, “Real-Time Image Tracking for Traffic Monitoring”, IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.3-6, Singapore, September 2002.
- Ti-Chung Lee, Tsai-Chi Yi, Kai-Tai Song, “Fast Parking control of Mobile Robots: A Motion Planning Approach With Experimental Validation”, IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol.12, No.5, pp.661-676, September 2004.
- Shraga Shoval, Johann Borenstein, Yoram Koren, “The Navbelt – A Computerized Travel Aid for the Blind”, Proceedings of the RESNA '93 conference, pp. 240-242. Las Vegas, Nevada, June 13-18, 1993.
- Shraga Shoval, Johann Borenstein, Yoram Koren, “Mobile Robot Obstacle Avoidance in a Computerized Travel Aid for the Blind”, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2023-2029. San Diego, CA, May 8-13, 1994.
- Shraga Shoval, Johann Borenstein, Yoram Koren, “Auditory Guidance With the NavBelt - A Computerized Travel Aid for the Blind”, IEEE Transactions on Systems, Vol. 28, No. 3, pp. 459-467. August, 1998.
- Shraga Shoval, Johann Borenstein, “The NavBelt – A Computerized Travel Aid for the Blind on Mobile Robotics Technology”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 45, No. 11, pp. 107-116. Nov. 1998.
- Susumu Tachi, Kiyoshi Komority, “Guide dog robot”. In 2nd International Symposium on Robotics Research, pages 333--340. MIT Press, 1985.
- Iwan Ulrich, Johann Borenstein, “The GuideCane - Applying Mobile Robot Technologies to Assist the Visually Impaired”, IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 31, No. 2, pp. 131-136. Mar. 2001.
- Yaowu Xu, Eli Saber, A. Murat Tekalp, “Object Segmentation and Labeling by Learning from Examples”, IEEE Transaction on Image Processing, Vol.2, No.6, pp.627-638, June 2003.
- 益眾科技 <http://www.icci.com.tw/book66/>.

表 1 由超音波測距誤差產生障礙物在 N1 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0. L, 0)之導盲系統				發射器在(0. 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.0	-0.3	-1.0	1.0	0.0	-0.2	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-29.9	29.7	-17.3	45.5	0.0	-41.6	1.5	41.6
-2.00	2.00	-2.00	29.9	29.7	-17.3	45.5	-42.4	-0.2	-10.5	43.7
2.00	2.00	-2.00	0.0	59.6	-37.7	70.5	-42.4	-41.6	-7.8	59.9
-2.00	-2.00	2.00	0.0	-58.5	-4.6	58.6	41.6	40.8	-32.0	66.4
2.00	-2.00	2.00	-29.4	-29.1	-1.8	41.4	41.6	0.2	-8.0	42.3
-2.00	2.00	2.00	29.4	-29.1	-1.8	41.4	0.0	40.8	-20.3	45.5
2.00	2.00	2.00	0.0	0.3	1.0	1.0	0.0	0.2	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			305.0				301.5			

表 2 由超音波測距誤差產生障礙物在 N2 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0. L, 0)之導盲系統				發射器在(0. 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.0	-0.3	-1.0	1.0	0.0	-0.2	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-59.5	59.2	-35.6	91.2	0.0	-83.4	3.9	83.4
-2.00	2.00	-2.00	59.5	59.2	-35.6	91.2	-84.1	-0.2	-19.6	86.4
2.00	2.00	-2.00	0.0	118.7	-79.8	143.0	-84.1	-83.4	-14.3	119.3
-2.00	-2.00	2.00	0.0	-117.6	-6.2	117.7	83.3	82.6	-66.5	134.9
2.00	-2.00	2.00	-58.9	-58.6	-2.6	83.2	83.3	0.2	-17.1	85.1
-2.00	2.00	2.00	58.9	-58.6	-2.6	83.2	0.0	82.6	-42.7	92.9
2.00	2.00	2.00	0.0	0.3	1.0	1.0	0.0	0.2	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			611.4				604.0			

表 3 由超音波測距誤差產生障礙物在 E1 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0. L, 0)之導盲系統				發射器在(0. 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	-0.3	0.0	-1.0	1.0	-0.2	0.0	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-29.7	29.4	0.2	41.8	-0.2	-42.4	-10.5	43.7
-2.00	2.00	-2.00	30.2	30.4	-17.8	46.4	-41.6	0.0	1.5	41.6
2.00	2.00	-2.00	0.8	59.9	-16.3	62.0	-41.6	-42.4	-7.8	59.9
-2.00	-2.00	2.00	-0.8	-58.7	-22.7	62.9	40.8	41.6	-32.0	66.4
2.00	-2.00	2.00	-29.6	-29.9	-2.0	42.1	40.8	0.0	-20.3	45.5
-2.00	2.00	2.00	29.1	-28.8	-19.0	45.1	0.2	41.6	-8.0	42.3
2.00	2.00	2.00	0.3	0.0	1.0	1.0	0.2	0.0	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			302.4				301.5			

表 4 由超音波測距誤差產生障礙物在 E2 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0. L, 0)之導盲系統				發射器在(0. 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	-0.3	0.0	-1.0	1.0	-0.2	0.0	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-59.2	59.0	-0.6	83.6	-0.2	-84.1	-19.6	86.4
-2.00	2.00	-2.00	59.7	60.0	-36.1	92.0	-83.4	0.0	3.9	83.4
2.00	2.00	-2.00	0.8	119.0	-35.6	124.2	-83.4	-84.1	-14.3	119.3
-2.00	-2.00	2.00	-0.8	-117.8	-42.0	125.1	82.6	83.3	-66.5	134.9
2.00	-2.00	2.00	-59.2	-59.4	-2.8	83.9	82.6	0.0	-42.7	92.9
-2.00	2.00	2.00	58.6	-58.4	-37.3	90.8	0.2	83.3	-17.1	85.1
2.00	2.00	2.00	0.3	0.0	1.0	1.0	0.2	0.0	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			601.5				604.0			

表 5 由超音波測距誤差產生障礙物在 W1 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0, L, 0)之導盲系統				發射器在(0, 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.3	0.0	-1.0	1.0	0.3	0.0	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-30.2	30.4	-17.8	46.4	0.3	-42.4	-10.5	43.7
-2.00	2.00	-2.00	29.7	29.4	0.2	41.8	-43.1	0.0	-25.0	49.9
2.00	2.00	-2.00	-0.8	59.9	-16.3	62.0	-43.1	-42.4	-38.2	71.5
-2.00	-2.00	2.00	0.8	-58.7	-22.7	62.9	42.3	41.6	-5.4	59.6
2.00	-2.00	2.00	-29.1	-28.8	-19.0	45.1	42.3	0.0	3.4	42.5
-2.00	2.00	2.00	29.6	-29.9	-2.0	42.1	-0.3	41.6	-8.0	42.3
2.00	2.00	2.00	-0.3	0.0	1.0	1.0	-0.3	0.0	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			302.4				311.4			

表 6 由超音波測距誤差產生障礙物在 W2 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0, L, 0)之導盲系統				發射器在(0, 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.3	0.0	-1.0	1.0	0.3	0.0	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-59.7	60.0	-36.1	92.0	0.3	-84.1	-19.6	86.4
-2.00	2.00	-2.00	59.2	59.0	-0.6	83.6	-84.9	0.0	-47.4	97.3
2.00	2.00	-2.00	-0.8	119.0	-35.6	124.2	-84.9	-84.1	-72.7	139.9
-2.00	-2.00	2.00	0.8	-117.8	-42.0	125.1	84.1	83.3	-11.8	119.0
2.00	-2.00	2.00	-58.6	-58.4	-37.3	90.8	84.1	0.0	5.8	84.3
-2.00	2.00	2.00	59.2	-59.4	-2.8	83.9	-0.3	83.3	-17.1	85.1
2.00	2.00	2.00	-0.3	0.0	1.0	1.0	-0.3	0.0	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			601.5				613.9			

表 7 由超音波測距誤差產生障礙物在 S1 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0, L, 0)之導盲系統				發射器在(0, 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.0	0.3	-1.0	1.0	0.0	0.3	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-29.9	30.2	0.1	42.5	0.0	-43.1	-25.0	49.9
-2.00	2.00	-2.00	29.9	30.2	0.1	42.5	-42.4	0.3	-10.5	43.7
2.00	2.00	-2.00	0.0	60.1	1.2	60.1	-42.4	-43.1	-38.2	71.5
-2.00	-2.00	2.00	0.0	-59.0	-47.6	75.8	41.6	42.3	-5.4	59.6
2.00	-2.00	2.00	-29.4	-29.6	-19.6	46.1	41.6	-0.3	-8.0	42.3
-2.00	2.00	2.00	29.4	-29.6	-19.6	46.1	0.0	42.3	3.4	42.5
2.00	2.00	2.00	0.0	-0.3	1.0	1.0	0.0	-0.3	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			315.1				311.4			

表 8 由超音波測距誤差產生障礙物在 S2 之座標計算誤差比較表(cm)

超音波測距誤差			發射器在(0, L, 0)之導盲系統				發射器在(0, 0, 0)之導盲系統			
$\Delta D_{EPA}$	$\Delta D_{EPB}$	$\Delta D_{EPC}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$D_{XYZ}$
-2.00	-2.00	-2.00	0.0	0.3	-1.0	1.0	0.0	0.3	-1.0	1.0
2.00	-2.00	-2.00	-59.5	59.7	-0.7	84.3	0.0	-84.9	-47.4	97.3
-2.00	2.00	-2.00	59.5	59.7	-0.7	84.3	-84.1	0.3	-19.6	86.4
2.00	2.00	-2.00	0.0	119.2	-0.5	119.2	-84.1	-84.9	-72.7	139.9
-2.00	-2.00	2.00	0.0	-118.1	-89.7	148.3	83.3	84.1	-11.8	119.0
2.00	-2.00	2.00	-58.9	-59.2	-37.9	91.7	83.3	-0.3	-17.1	85.1
-2.00	2.00	2.00	58.9	-59.2	-37.9	91.7	0.0	84.1	5.8	84.3
2.00	2.00	2.00	0.0	-0.3	1.0	1.0	0.0	-0.3	1.0	1.0
$\Sigma D_{XYZ}$			621.5				613.9			